



UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ DIN BUCUREȘTI  
FACULTATEA DE ENERGETICĂ  
ȘCOALA DOCTORALĂ ENERGETICĂ

## REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

---

CONTRIBUȚII LA STUDIUL MATERIALELOR DE STRUCTURĂ  
CANDIDATE PENTRU REACTORII NUCLEARI DE GENERAȚIA IV

---

Conducător de doctorat:  
Prof. Dr. Ing. Ilie PRISECARU

Student doctorand:  
ȘELĂVÎRTEA Florentina

București  
2020

# CUPRINSUL TEZEI

<b>1. INTRODUCERE.....</b>	<b>9</b>
1.1 MOTIVAȚIE .....	9
1.2 SCOPUL ȘI OBIECTIVELE.....	9
1.3 ORGANIZAREA TEZEI .....	10
<b>2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND UTILIZAREA UNOR MATERIALE CANDIDATE PENTRU REACTORII RĂCIȚI CU APĂ SUPERCRITICĂ (SCWR) .....</b>	<b>11</b>
2.1 CONCEPTELE REACTOARELOR RĂCITE CU APĂ SUPERCRITICĂ DE GEN IV .....	11
2.2 MATERIALE DE STRUCTURĂ CANDIDATE PENTRU REACTORII RĂCIȚI CU APĂ SUPERCRITICĂ DE GENERAȚIE IV .....	16
<b>3. NOȚIUNI TEORETICE UTILIZATE - OXIDAREA ȘI COROZIUNEA ÎN APĂ SUPERCRITICĂ, METODE DE ANALIZĂ .....</b>	<b>22</b>
3.1 APA SUPERCRITICĂ .....	22
3.2 DENSITATEA .....	22
3.3 VALOAREA PRODUSULUI IONIC ȘI A PH-ULUI .....	23
3.4 TIPURI DE COROZIUNE ȘI PARAMETRI CARE INFLUENȚEAZĂ COROZIUNEA .....	24
3.4.1 <i>Parametrii care influențează coroziunea .....</i>	<i>25</i>
3.5 METODE DE ANALIZĂ FIZICO-CHIMICĂ PENTRU EVALUAREA COMPORTĂRII LA COROZIUNE ÎN SCW.....	28
3.5.1 <i>Metoda gravimetrică .....</i>	<i>28</i>
3.5.2 <i>Examinarea metalografică.....</i>	<i>29</i>
3.5.3 <i>Caracterizarea prin microscopie electronică de baleiaj (SEM).....</i>	<i>29</i>
3.5.4 <i>Caracterizarea prin spectrometrie de radiații X cu dispersie după energie (EDS).....</i>	<i>30</i>
3.5.5 <i>Caracterizarea prin difracție de radiații X (XRD) .....</i>	<i>30</i>
<b>4. MATERIALELE ȘI ECHIPAMENTE UTILIZATE, PROCEDURILE EXPERIMENTALE .....</b>	<b>33</b>
4.1 MATERIALE ȘI COMPOZIȚIA LOR .....	33
4.2 PREGĂTIREA PROBELOR .....	33
4.3 TESTAREA ÎN APĂ SUPERCRITICĂ ÎN AUTOCLAVE .....	34
4.3.1 <i>Condiții de testare.....</i>	<i>34</i>
4.3.1 <i>Analize/caracterizare și echipamente utilizate .....</i>	<i>34</i>
<b>5. REZULTATELE ANALIZELOR .....</b>	<b>37</b>
5.1 REZULTATELE ANALIZELOR PRIN METODA GRAVIMETRICĂ.....	37
5.2 REZULTATELE ANALIZELOR METALOGRAFICE.....	38
5.2.1 <i>Rezultatele analizelor metalografice ale oțelurilor 304L și 310S prin microscopie optică .....</i>	<i>Error!</i>
<b><i>Bookmark not defined.</i></b>	
5.2.2 <i>Rezultatele analizelor metalografice ale aliajelor pe bază de nichel Incoloy 800HT și Inconel 718 prin microscopie electronică de baleiaj .....</i>	<i>39</i>
5.3 CARACTERIZAREA PROBELOR PRIN MICROSCOPIE ELECTRONICĂ DE BALEIAJ CUPLATĂ CU SPECTROMETRIE DE RADIAȚII X CU DISPERSIE DUPĂ ENERGIE (SEM-EDS).....	41
5.3.1 <i>Probele fără expunere.....</i>	<i>41</i>
5.3.2 <i>Analize SEM și EDS de suprafață pe 304L .....</i>	<i>47</i>
5.3.2.1 <i>Analize SEM de suprafață ale 304L expus în SCW timp de 10, 20 și respectiv 63 de zile .....</i>	<i>47</i>
5.3.2.2 <i>Analize EDS de suprafață pe 304L expus în SCW timp de 10, 20 și respectiv 63 de zile .....</i>	<i>51</i>
5.3.3 <i>Analize SEM și EDS de suprafață pe 310S .....</i>	<i>61</i>
5.3.3.1 <i>Analize SEM de suprafață pe 310S expus în SCW timp de 10 și 63 de zile .....</i>	<i>61</i>
5.3.3.2 <i>Analize EDS de suprafață pe 310S expus în SCW timp de 10 și respectiv 63 de zile .....</i>	<i>63</i>
5.3.4 <i>Analize SEM și EDS de suprafață pe Incoloy 800HT.....</i>	<i>68</i>
5.3.4.1 <i>Analize SEM de suprafață pe Incoloy 800HT expus în SCW timp de 10, 20 și respectiv 70 de zile .....</i>	<i>68</i>
5.3.4.2 <i>Analize EDS de suprafață pe Incoloy 800HT expus în SCW timp de 20 și respectiv 70 de zile .....</i>	<i>70</i>

5.3.5	<i>Analize SEM și EDS de suprafață pe Inconel 718.....</i>	74
5.3.5.1	<i>Analize SEM de suprafață pe Inconel 718 expus în SCW timp de 10, 20 și 70 de zile.....</i>	74
5.3.5.2	<i>Analize EDS de suprafață pe Inconel 718 expus în SCW timp de 10, 20 și respectiv 70 de zile .....</i>	76
5.4	<b>CARACTERIZAREA PROBELOR PRIN DIFRACTIE CU RADIAȚII X (XRD).....</b>	<b>85</b>
5.4.1	<i>Analiza de fază calitativă și cantitativă pentru 304L expus în apă supercritică timp de 10, 20 și respectiv 63 de zile .....</i>	<i>85</i>
5.4.2	<i>Analiza de fază calitativă și cantitativă pentru 310S expus în apă supercritică timp de 10 și respectiv 63 de zile .....</i>	<i>90</i>
5.4.3	<i>Analiza de fază calitativă și cantitativă pentru Incoloy 800HT expus în apă supercritică timp de 20 și respectiv 70 de zile .....</i>	<i>93</i>
5.4.4	<i>Analiza de fază calitativă pentru Inconel 718 expus în apă supercritică timp de 20 și respectiv 70 de zile</i> <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
<b>6.</b>	<b>CONCLUZII.....</b>	<b>99</b>

### **Cuvinte cheie:**

Reactorii nucleari de generația IV, SCWR, materiale de structură, oțeluri inoxidabile austenitice, aliaje pe bază de nichel, oxidare, teste de coroziune gravimetrice, SEM-EDS, XRD.

## **LISTA DE ABREVIERI**

ACR - Advanced CANDU Reactor

ASTM - American Society for Testing Materials

BSE - Backscattered Electron Detector

BWR - Boiling Water Reactor

CANDU – CANadian Deuterium Uranium

CNE – Centrală Nuclearo-Electrică

EDS - Energy Dispersive Spectrometer

FESEM - Field Emission Scanning Electron Microscopy

GIF - Generation IV International Forum

IC - Intergranular Corrosion

JCPDS = Joint Committee on Powder Diffraction Standards

ODS - Oxide Dispersion Strengthened Alloys

PDF - Powder Diffraction Files,

PHWR - Pressurized Heavy Water Reactor

PWR - Pressurized Water Reactor

RIR - Raportul Intensității de Referință

SCC - Stress corrosion cracking

SCW - SuperCritical Water

SCWR - SuperCritical Water-cooled Reactor

SE - Secondary Electrons

SEM - Scanning Electron Microscopy

XRD - X-Ray Diffraction

# INTRODUCERE

## 1.1 Motivație

Selectarea materialelor candidate adecvate, este o problemă cheie pentru dezvoltarea reactorului nuclear răcit cu apă supercritică (SCWR). Proiectarea sau alegerea celor mai potrivite materiale înseamnă o mai bună durabilitate, economie și siguranță. Deoarece apa supercritică (SCW) este un mediu coroziv foarte agresiv, coroziunea devine o problemă dificilă pentru materialele utilizate în SCWR.

Performanța la coroziune a materialelor candidate în SCW poate fi afectată de mai mulți factori, inclusiv compoziția și structura materialului, temperatura și presiunea SCW, chimia apei și timpul de expunere. Au fost făcute mai multe investigații pentru a studia comportamentul la coroziune al diferitelor materiale candidate în diferite medii SCW, urmărind să se găsească cele mai potrivite materiale, precum și o metodă eficientă de control a coroziunii în SCW.

Oțelurile inoxidabile austenitice și aliajele pe bază de nichel au fost luate în considerare ca materiale candidate pentru a fi utilizate în SCWR [1, 2, 3, 4] S-au depus eforturi pentru a evalua performanța la coroziune a acestora în mediile SCW [5, 6, 7]. Cu toate acestea, încă sunt necesare studii suplimentare complexe asupra comportamentului coroziunii oțelurilor inoxidabile austenitice și aliajelor pe bază de nichel.

## 1.2 Scopul și obiectivele

Această cercetare se concentrează pe investigarea comportamentului de oxidare a unor oțeluri inoxidabile austenitice și a unor aliaje pe bază de nichel în mediul SCWR. De asemenea, pentru a investiga modificările morfologice și structurale ale filmelor de oxizi s-au efectuat analize prin tehnici de caracterizare avansate: teste de coroziune prin analiza gravimetrică, Microscopie Optică, Microscopie Electronică de Baleiaj cuplată cu Spectrometrie de Radiații X cu Dispersie după Energie (SEM-EDS) și Difracție cu Radiații X (XRD). Obiectivele principale ale acestui studiu sunt următoarele:

- Efectuarea testelor de oxidare a unor oțeluri inoxidabile austenitice și a unor aliaje pe bază de nichel în condiții de apă supercritică;
- Investigarea comportamentului de oxidare al oțelurilor inoxidabile austenitice și al aliajelor pe bază de nichel prin tehnici avansate de caracterizare;
- Evaluarea influenței timpului de expunere, asupra comportamentului de oxidare al unor oțeluri inoxidabile austenitice și al unor aliaje pe bază de nichel în condiții de apă supercritică;
- Identificarea materialelor cu cele mai bune caracteristici care ar putea fi utilizate ca componente interne în viitoarele reactoare de tip SCWR, din Generația IV.

## ORGANIZAREA TEZEI

Teza de doctorat cu titlul „*Contribuții la studiul materialelor de structură candidate pentru reactorii nucleari de generația IV*” a fost structurată pe 6 capitole al căror conținut este sintetizat în paragrafele de mai jos după cum urmează:

În **Capitolul 1** este prezentată motivația realizării tezei de doctorat alături de scopul și obiectivele acesteia.

**Capitolul 2** reprezintă documentarea privind stadiul actual, la nivel mondial, al studiului conceptelor de reactori răciți cu apă supercritică de Gen IV și al studiului materialelor candidate pentru acestea. În urma documentării, au fost luate în considerare oțelurile inosidabile austenitice și aliajele pe bază de nichel ca fiind printre cele mai de interes pentru scopul propus.

Există, practic, trei direcții de cercetare și dezvoltare a materialelor pentru SCWR:

1. Selectarea materialelor dintre cele existente care sunt cel mai așteptate să satisfacă cerințele SCWR;
2. Dezvoltarea sau proiectarea de materiale noi care se așteaptă să aibă caracteristici mai bune decât cele existente;
3. Modificarea materialelor existente pentru a îmbunătăți caracteristicile lor.

Proprietățile mecanice și rezistența la coroziune ale oțelurilor inoxidabile și aliajelor pe bază de nichel, le fac opțiuni viabile pentru componentele reactoarelor expuse la temperaturi și presiuni ridicate. Oțelurile inoxidabile austenitice și aliajele pe bază de Ni sunt deja utilizate pe scară largă în proiectarea centralelor nucleare și sunt considerate materiale de interes pentru tecile de combustibil și componentele de bază din SCWR propus [26].

Până acum, au fost publicate mai multe lucrări de cercetare privind comportamentul la coroziune al diverselor materiale, inclusiv oțelurile inoxidabile și aliaje pe bază de Ni, în condiții de apă supercritică [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]. În *Tabelul 1* de mai jos sunt redate clasele de aliaje studiate în condiții SCWR.

Alegerea unui aliaj care va menține integritatea stratului de pasivare în condițiile de curgere SCW, este o cerință esențială pentru a selecta materiale pentru teaca de combustibil, tuburile de presiune și alte componente expuse radiațiilor [35].

Prin urmare, este crucial să se identifice în mod corespunzător mecanismele proceselor care afectează durata de viață a materialelor candidate în condiții relevante prin teste experimentale ample [36, 37, 38, 39, 40].

*Tabelul 1 Clasele de aliaje studiate în condiții SCWR*

Clasele de aliaje	Temperatura °C	Chimia apei	Timpul de expunere (h)
<b>Austenitice</b>	290-650	Concentrația de oxigen dizolvat 8 ppm	24-3000
<b>Pe bază de Ni</b>	290-600	Concentrația de oxigen dizolvat 8 ppm. Conductivitatea <0.1 mS /cm	24-3000
<b>Feritic-martinsetic</b>	290-650	Concentrația de oxigen dizolvat 8 ppm. Conductivitatea <0.1 mS /cm	100-3000
<b>ODS</b>	360-600	25 ppb Concentrația de oxigen dizolvat	200-3000
<b>Zirconiu</b>	400-500	Concentrația de oxigen dizolvat Conductivitatea <0.1 mS /cm	<2880
<b>Titaniu</b>	290-550	Concentrația de oxigen dizolvat 8 ppm. Conductivitatea 0.1 mS /cm	500

În **capitolul 3** au fost descrise aspecte și particularități privind oxidarea și coroziunea în apă supercritică, tipuri de coroziune și parametri care influențează coroziunea și metode de analiză fizico-chimică pentru evaluarea comportării la coroziune în SCW.

Metodele de analiză fizico-chimică prin care au fost evaluate materialele selectate, privind comportarea la coroziune în apă supercritică, sunt următoarele:

- Metoda gravimetrică
- Examinarea metalografică
- Caracterizarea prin microscopie electronică de baleiaj (SEM)
- Caracterizarea prin spectrometrie de radiații X cu dispersie după energie (EDS)
- Caracterizarea prin difracție de radiații X (XRD)

**Capitolul 4** prezintă materialele selectate pentru acest studiu, pregătirea probelor, condițiile de testare ale acestora, echipamentele utilizate și analizele efectuate.

Ca materialele potențiale pentru Gen IV SCWR, am ales pentru această cercetare patru materiale (**OL 304L, OL 310, Incoloy 800HT și Inconel 718**), deoarece au un echilibru optim de rezistență structurală și rezistență la coroziune necesare pentru aplicațiile în centrale termice la temperaturi ridicate. Acestea pot fi utilizate pentru tecile de combustibil și componentele de bază din SCWR. Compoziția chimică a materialelor testate este dată în tabelul de mai jos (*Tabelul 2*).

Tabelul 2 Compozițiile chimice ale materialelor testate conform buletinelor emise de furnizor

Aliaj/elemente chimice	C	Al	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Mo	Co	Ti	Nb	Fe
<b>304L</b>	0.03		0.46	1.37	0.028	0.0006	<b>18.07</b>	<b>8.11</b>	-	-	-		-		71.9
<b>310S</b>	0.063		0.71	1.61	0.016	0.001	<b>24.13</b>	<b>19.03</b>	-	-	-		-		54.34
<b>Incoloy800HT</b>	0.077	0.51	0.34	0.71	-	<0.001	<b>20.06</b>	<b>31.22</b>	-	0.41	-	0.61	0.52		45.19
<b>Inconel 718</b>	0.028	0.48	0.07	0.06	0.005	<0.001	<b>19.03</b>	<b>53.61</b>	-	0.02	3.05	0.16	1.04	5.5	17.2

Eșantioanele au fost prelevate sub formă paralelipipedică din fiecare material aflat în stare de livrare de la Outokumpu Stainless AB Company [98]. Au fost pregătite două respectiv trei eșantioane din fiecare material pentru fiecare testare. Aceasta reprezentând un total de 10 eșantioane pentru fiecare condiție de testare. *Testele propriu-zise au fost realizate în mediu apos, în condițiile specifice circuitului primar existent în reactorul SCWR prin autoclavizare* în apă demineralizată, în două autoclave statice, care au operat la temperatura de 550°C și presiunea de 25 MPa, parametri caracteristici sistemelor SCWR.

Fiecare eșantion, înainte de expunere în condiții de mediu apos la temperatura de 550°C (25 MPa), a fost tăiat din materialul selectat aflate în stare de livrare, șlefuit mecanic pe hârtie abrazivă de diferite granulații (#600, # 800, #1200) și apoi cu pastă diamantată până la luciu metalic. După acest proces, eșantioanele au fost codificate pentru identificarea ușoară pe tot parcursul testelor și expuse în aparatul de ultrasonare în acetonă pentru 30 de minute. După ultrasonare au fost uscate și cântărite la o balanță analitică cu o precizie de  $\pm 1 \times 10^{-4}$ g.

În vederea obținerii filmelor de oxizi, eșantioanele au fost expuse în apă demineralizată, în două autoclave statice de 1l la temperatura de 550°C pe diferite perioade de până la 70 de zile. Schema autoclavei utilizate se poate observa în *Figura 1*.



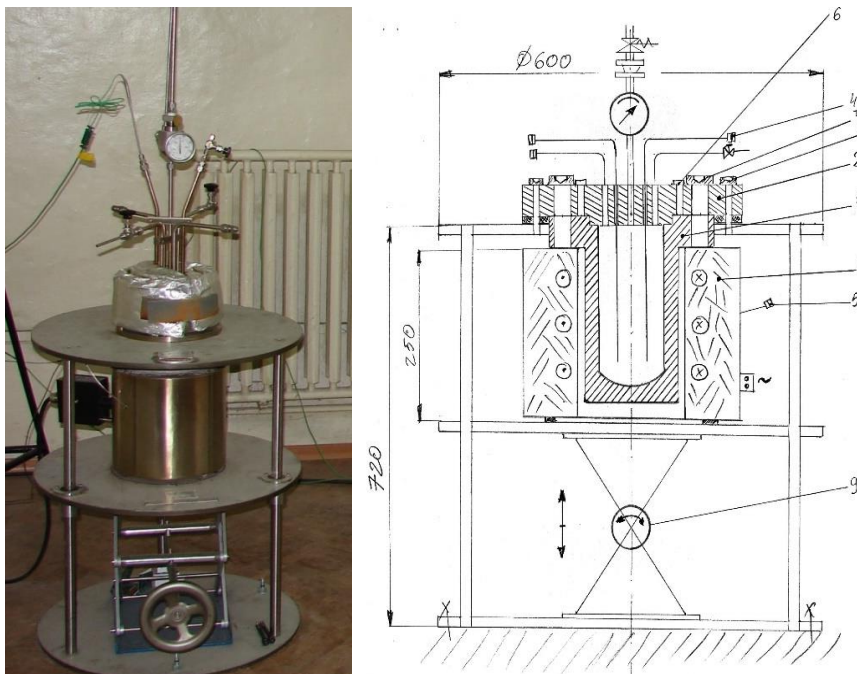


Figura 1 Autoclava de 1l pentru temperaturi supercritice și schema sa: 1-Corp autoclavă; 2- Capac autoclavă; 3-Cuptor; 4-Termocuplu incintă; 5-Termocuplu cuptor; 6-Șurub desprindere; 7-Șurub strangere capac-corp autoclavă; 8-Surub fixare capac-corp autoclavă; 9-Cric coborare - ridicare cuptor.

Ph-ul apei demineralizate în care au fost expuse probele, măsurat la temperatura camerei a fost de aproximativ 6.7 (la temperaturi ridicate pH-ul scade, putând ajunge la valori în jur de 4,5). Presiunea la care s-a lucrat a fost de 25MPa. Pentru a lucra cu un conținut de oxigen de aproximativ 2 ppm, la fiecare expunere în autoclavă, s-a eliminat oxigenul din apă prin degazare termică în momentul în care apa a ajuns la temperatura de 100<sup>0</sup>C.

### Analize/caracterizare și echipamente utilizate

Pe parcursul testării în autoclave, s-a monitorizat **coroziunea uniformă** a eșantioanelor prin metoda gravimetrică; aceasta a constat în determinarea masei probelor prin cântărire utilizând o balanță care are precizia egală cu ( $\pm 1.10^{-4}$ )g, în vederea stabilirii variațiilor de masă în timp, din 10 în 10 zile, după scoaterea din autoclave, spălare și uscare. Rezultatele obținute reprezintă câștigul masic al materialelor.

Pe baza cântăririlor inițiale și a celor obținute după autoclavizare, s-a determinat variația masei  $\Delta W$  în [mg], ( $W_{final} - W_{initial}$ ) care s-a raportat la suprafața calculată în  $dm^2$ , a eșantioanelor. În felul acesta s-a determinat variația masei pe unitatea de suprafață a eșantionului  $\Delta W/S$  (mg/dm<sup>2</sup>), care raportată la timpul de expunere, exprimat în zile, a condus la **viteza de coroziune** în  $mg/dm^{-2}zi^{-1}$ .

S-a efectuat **analiza metalografică** utilizând microscopul optic OLYMPUS BX51M, care a evidențiat constituenții structurali ai probelor obținuți în urma testelor efectuate în autoclave. În acest scop s-au selectat trei probe din fiecare material. În cazul aliajelor

inoxidabile austenitice 304L și 310S s-a realizat un studiu comparativ, pe imagini bulk transversale, pornind de la proba etalon și continuând cu probele testate timp de 10 și respectiv 63 de zile. Studiul metalografic s-a realizat în lumină reflectată, la mărirea de 500×, în urma gravurii electrolitice cu acid oxalic.

Morfologia de suprafață a eșantioanelor după expunere au fost caracterizate prin Microscopie Electronică de Baleiaj cuplată cu Spectrometrie de Radiații X cu Dispersie după Energie (SEM-EDS) și Difracție cu Radiații X (XRD).

Analizele de Microscopie Electronică de Baleiaj cuplată cu Spectrometrie de Radiații X cu Dispersie după Energie (SEM-EDS) au fost realizate cu microscopul electronic FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) Hitachi SU5000 (*Figura 2*), la Centrul Regional de Cercetare-Dezvoltare pentru Materiale, Procese și Produse Inovative destinate Industriei de Automobile (CRC&D-Auto) în laboratorul Materiale Avansate Microscopie Electronică din cadrul Universității din Pitești.



*Figura 2 Microscopul electronic de baleiaj Hitachi SU5000*

Măsurătorile XRD au fost efectuate pe un difractometru Rigaku Ultima IV (*Figura 3*), la Centrul Regional de Cercetare-Dezvoltare pentru Materiale, Procese și Produse Inovative destinate Industriei de Automobile (CRC&D-Auto) în laboratorul de Materiale Avansate Tehnici cu Radiații X din cadrul Universității din Pitești folosind radiația de Cu și geometrie Bragg-Brentano. Pentru analizele de fază calitativă, spectrele de difracție cu radiații X au fost achiziționate în geometrie Bragg-Brentano, în intervalul unghiular  $2\theta$  ( $18^{\circ}$ - $120^{\circ}$ ), cu o lărgime a pasului de măsurare de  $0,05^{\circ}/\text{min}$ , viteză de scanare  $1^{\circ}/\text{min}$ , tensiune de accelerare 40 kV, curent filament 30 mA. De asemenea, pe probele selectate, au fost efectuate analize de fază cantitativă prin Raportul Intensității de Referință (RIR).



*Figura 3 Difractometrul Rigaku Ultima IV*

Avantajul net al echipamentului îl constituie timpul redus de achiziție și utilizarea unei cantități mici de probă.

**Capitolul 5** s-a concentrat asupra rezultatelor analizelor efectuate privind comportamentul oxidării oțelurilor inoxidabile austenitice și aliajelor pe bază de nichel testate în apă supercritică. Analizele au fost efectuate prin metoda gravimetrică, Microscopie Optică, Microscopie Electronică de Baleiaj cuplată cu Spectrometrie de Radiații X cu Dispersie după Energie (SEM-EDS) și Difracție cu radiații X (XRD). Rezultatele analizelor au fost discutate în detaliu.

Ultimul capitol, **capitolul 6** prezintă concluziile.

## CONCLUZII

În cadrul tezei am investigat comportamentul de oxidare a patru materiale, două oțeluri inoxidabile auxtenitice (304 L și 310 S) și două aliaje pe bază de nichel (Incoloy 800 HT și Inconel 718), în mediul simulat ale reactorului nuclear răcit cu apă supercritică de generația IV. Testarea materialelor s-a realizat prin autoclavizare în apă supercritică la temperatura de 550<sup>0</sup>C și presiunea de 25 MPa la diferite perioade de până la 70 de zile cu scopul de a contribui la selectarea celor mai bune materiale de structură în vederea realizării reactorilor de generația IV răciți cu apă supercritică.

Pentru a investiga modificările morfologice și structurale ale filmelor de oxizi am efectuat analize prin tehnici de caracterizare avansate: teste de coroziune prin analiza gravimetrică, Microscopie Optică, Microscopie Electronică de Baleiaj cuplată cu Spectrometrie de Radiații X cu Dispersie după Energie (SEM-EDS) și Difracție cu Radiații X (XRD).

Ratele de coroziune pentru materialele selectate, expuse în apă supercritică au fost determinate de creșterea în greutate într-un interval de timp de până la 70 de zile. Valorile scăzute ale ratelor de coroziune de la 12 la 0,5 mg dm<sup>-2</sup>zi<sup>-1</sup> pentru 304L, identificate ca fiind cele mai mari din cele patru material testate și de la 5 la 0,1 mg dm<sup>-2</sup> ziua<sup>-1</sup> pentru 310S identificate ca fiind cele mai mici, au demonstrat că 310S are un comportament mai bun la coroziune în mediul reactorului nuclear SCWR. De asemenea s-a constatat că materialele 310S, Incoloy 800 HT și Inconel 718 își păstrează valorile apropiate ceea ce reprezintă un comportament mai bun la coroziune al acestora în mediul SCWR.

Imaginile SEM pe 304L după ce au fost testate timp de 63 de zile în SCW arată în primul rând insule separate până la formarea filmului de oxid care acoperă întreaga suprafață de oțel, ceea ce este în conformitate cu rezultatele creșterii în greutate. Procesul de creștere a straturilor de oxid în timpul expunerii poate fi descris ca o nucleație inițială a oxidului în situurile selectate, urmată de o creștere uniformă a cristalelor de oxid până când acestea se conectează între ele, rezultând un strat compact. Analiza EDS indică concentrații crescute de Fe și O care sugerează că oxidul format pe suprafața de oțel 304L ar putea fi oxid de fier (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Valorile mari ale creșterii în greutate și formării excesive de oxid de fier pe suprafață pot reprezenta o performanță scăzută la coroziune a oțelului 304L, comparativ cu celelalte materiale.

Din analiza de fază calitativă și cantitativă prin difracție de radiații X, pentru 304L expus în apă supercritică timp de 63 de zile, s-au identificat două feze: (CrFeMnFe) Cr<sub>0.193</sub> Mn<sub>0.016</sub> Fe<sub>0.697</sub> Ni<sub>0.094</sub> și (magnetită) Cr<sub>0.03</sub> Fe<sub>2.96</sub> Ni<sub>0.01</sub> O<sub>4</sub>. Prin raportul intensității de referință (RIR) s-au determinat concentrațiilor în amestecuri complexe. S-a observa concentrația cea mai mare (aproximativ 91 %), reprezentată de faza Cr<sub>0.03</sub> Fe<sub>2.96</sub> Ni<sub>0.01</sub> O<sub>4</sub>(magnetită), urmată de concentrația fazei Cr<sub>0.193</sub> Mn<sub>0.016</sub> Fe<sub>0.697</sub> Ni<sub>0.094</sub> (aproximativ 9%).

Din analizele SEM ale 310S se observă că după 63 de zile de testare în condiții simulate SCW, stratul de oxid (observabil la o mărire de x30k) a rămas subțire și stabil. Analizele EDS au arătat concentrații crescute de Fe și O (adică formare de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) împreună cu cantități mici de Cr și Mn, ceea ce ar putea sugera formarea pe suprafața probei de oxid de crom (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sau chiar un tip de spinel mixt de oxid (Fe<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>).

Prin difracție de radiații X pe 310S, expus în apă supercritică timp de 63 de zile s-au identificat trei faze: Cr<sub>0.193</sub> Mn<sub>0.016</sub> Fe<sub>0.697</sub> Ni<sub>0.094</sub> (CrFeMnNi), Cr<sub>0.03</sub> Fe<sub>2.96</sub> Ni<sub>0.01</sub> O<sub>4</sub> (Magnetită) și Cr<sub>2</sub> O<sub>3</sub>. Prin raportul intensității de referință (RIR) s-au determinat concentrația cea mai mare (aproximativ 81 %), reprezentată de faza Cr<sub>0.03</sub> Fe<sub>2.96</sub> Ni<sub>0.01</sub> O<sub>4</sub>(magnetită), urmată de concentrația fazei Cr<sub>0.193</sub> Mn<sub>0.016</sub> Fe<sub>0.697</sub> Ni<sub>0.094</sub> (aproximativ 10%) și Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aproximativ 8%.

Se poate afirma că oțelul 310S are o mai bună rezistență la coroziune în apa supercritică datorită conținutului ridicat de crom care duce la dezvoltarea unui strat protector de oxid bogat în crom (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) format în timpul oxidării la temperaturi ridicate în SCW pe suprafața materialului.

Rezultatele SEM pe Incoloy 800HT după oxidare timp de 70 de zile în SCW au arătat două tipuri de zone cu culori diferite dezvoltate la suprafață. Morfologia particulelor găsite în ambele zone este foarte asemănătoare, se observă creșterea uniformă a grăunților de oxid până la conectarea lor, rezultând un strat compact. Rezultatele analizei EDX au indicat procente ridicate de fier și oxigen care sugerează prezența magnetitei (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Ceilalți oxizi care apar pe suprafața Incoloy 800HT testat timp de 70 de zile se consideră a fi oxid de crom (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) și / sau oxid spinel de tip NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, deoarece a fost detectată o concentrație mai mare de crom.

Din analiza de fază calitativă și cantitativă pentru Incoloy 800HT expus în apă supercritică timp de 70 de zile a acestei probe s-au identificat trei faze: Cr<sub>0,10</sub>Fe<sub>0.65</sub>Ni<sub>0.25</sub> (CrFeNi), Ni<sub>0.4</sub> Fe<sub>2.6</sub> O<sub>4</sub> și Cr<sub>2</sub> O<sub>3</sub>. Prin raportul intensității de referință (RIR) s-au determinat concentrația cea mai mare (aproximativ 50% ), reprezentată de faza Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> urmată de concentrația fazei Cr<sub>0,10</sub>Fe<sub>0.65</sub>Ni<sub>0.25</sub> (CrFeNi), (aproximativ 39%) și de Ni<sub>0.4</sub>Fe<sub>2.6</sub>O<sub>4</sub> (aproximativ 10%).

Pe suprafața aliajului Incoloy 800HT expus în apă supercritică, în filmele de oxid formate, s-au identificat concentrații și mai mari de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> care indică un strat protector mai stabil care împiedică eficient difuzarea exterioară a elementelor de aliere și interior difuzia ionilor de oxigen, reducând astfel rata de coroziune a substratului.

Din analizele SEM ale suprafeței Inconel 718, se observă că cristalitele poliedrice sunt distribuite sub formă de insule pe o scară subțire de oxid, ca în cazul aliajului 800HT, cu excepția cazului în care acești cristalini sunt mai mici. Analiza EDX de suprafață indică procente ridicate de O, Fe, Ni, Cr în oxizii dezvoltați ca insule pe suprafața eșantioanelor

Inconel 718. Din mapare se pare că Fe, Nb și O sunt concentrate în interiorul zonei insulare, în timp ce Ni și Cr se găsesc în apropiere.

Din analiza de fază calitativă pentru Inconel 718 expus în apă supercritică timp de 70 de zile a acestei probe s-au identificat trei faze: Fe<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> și Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Din analiza picurilor de difracție suprapuse, se observă o deplasare sistematică după unghiul  $2\theta$ , spre stanga (unghiul  $\theta$  scade), rezultă că în urma testelor de oxidare apar în stratul de oxid, pe picurile identificate, tensiuni de întindere ceea ce poate fi asociat cu o scădere a durității suprafeței (micșorarea densității de atomi în suprafață).

Din studiul efectuat se poate afirma că oțelul inoxidabil austenitic 310S și aliajul pe bază de nichel Incoloy 800HT au o rezistență bună la coroziune în apa supercritică datorită conținutului ridicat de crom care duce la un strat mai stabil format pe suprafață ceea ce le face favorabile în scopul propus.

În sfera studiului, câteva recomandări pe baza contribuției curente în acest studiu sunt:

- Din literatura de specialitate straturile de oxid depuse prin teste de oxidare formează de obicei multistrat. Pentru a evidenția astfel de structuri multistrat activitățile de cercetare desfășurate până acum pot fi continuate cu analize SEM-EDX în secțiune;
- Datorită datelor experimentale limitate, deoarece încercările de autoclavizare necesită perioade lungi de testare este recomandat să se efectueze teste de expunere în mediu supercritic în instalații precum bucle de coroziune;
- Este de dorit ca metoda de testare să poată simula cât mai mulți din parametrii reali din circuitele în care operează componentele executate din aliajele selectate în reactorii nucleari SCWR.

**În cadrul susținerii din școala doctorală s-a concluzionat ca lucrarea îndeplinește condițiile unei teze de doctorat și s-a propus susținerea publică.**

## BIBLIOGRAFIE

- [1] U. Ehrnstén, Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Austenitic, Comprehensive Nuclear Materials, 2012.
- [2] R. S. S. Y. (. T.R. Allen, Comprehensive Nuclear Materials, Elsevier, Amsterdam, 2012.
- [3] D. M. A. K. Z. C. D. RODRIGUEZ, Surface chemistry and corrosion behavior of Inconel 625 and 718 in subcritical, supercritical, and ultrasupercritical water, Applied Surface Science, 2017.
- [4] D. P. S. C. W. Z. W. K. J. GUZONAS, The reproducibility of corrosion testing in supercritical water—Results of an international interlaboratory comparison exercise, Corrosion Science, 2016.
- [5] R. C.-O. K. C. D. G. I.M. Svishchev, Corrosion behavior of stainless steel 316 in sub- and supercritical aqueous environments: Effect of LiOH additions, Corros. Sci., (2013).
- [6] T. A. Y. Y. L. Tan, Corrosion behavior of alloy 800H (Fe–21Cr–32Ni) in supercritical water, Corros. Sci., 2011.
- [7] D. M. A. C. D. RODRIGUEZ, On the oxidation of stainless steel alloy 304 in subcritical and supercritical water, Journal of Nuclear Materials, 2014.
- [8] T. G. I. I. Forum, GIF, 2017. <https://www.gen-4.org/gif/jcms>.
- [9] D. Danielyan, Supercritical-Water-Cooled Reactor System-as one the most promising type of Generation IV, Nuclear Reactor Systems INEEL, 2003.
- [10] K. S. T. L. E. Fischer, rDesign of a supercritical water-cooled reactor with a three-pass core arrangement, Nuclear Engineering and Design, 2009.
- [11] J. D. N. J. M. S. J. Z. Mohammad Mizanur Rahmanab, Design concepts of supercritical water-cooled reactor (SCWR) and nuclear marine vessel: A review, Progress in Nuclear Energy, 2020.
- [12] Y. I. a. S. K. Oka, Research and Development of Super LWR and Super Fast Reactor, Proc. of 3rd Int. Symposium on SCWR, Shanghai, China: Paper No. SCR2007-I003, March, 2007.
- [13] IAEA-TECDOC-1391, Status of advanced light water reactor designs, 2004.
- [14] J. Buongiorno, The Supercritical Water Cooled Reactor: Ongoing Research and Development in the U.S., Proceedings of ICAPP, Paper 4229, 2004.
- [15] A. K. S. K. a. Y. O. K. Dobashi, Conceptual design of a high temperature power reactor cooled and moderated by supercritical light water, Ann. Nucl. Energy, Vol. 25, No. 8, pp. 487 505,

1998.

- [16] P. E. M. Jacopo Buongiorno, Supercritical Water Reactor (SCWR) Progress Report for the FY-03 Generation-IV R&D Activities for Development of the SCWR in the U.S, 2003.
- [17] N. A. D. L. H. G. R. T. S. J. Starflinger, Status on R&D Planning for Supercritical Water Cooled Reactor Systems in the 6th European Framework Programme, 2004.
- [18] M. e. a. Yetisir, Conceptual mechanical design for a pressure-tube type supercritical, Conference: 5th International Symposium on Supercritical-Water-Cooled Reactors (ISSCWR-5) At: Vancouver, British Columbia, Canada, 2011.
- [19] I. A. E. AGENCY, Heat Transfer Behaviour and Thermohydraulics Code Testing for Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs), Vienna: IAEA-TECDOC-1746, 2014.
- [20] M. e. a. Yetisir, Fuel assembly concept of the Canadian SCWR, Proc. 8th Int. Sym., 2017.
- [21] T. L. L. SCHULENBERG, Super-critical water-cooled reactors”, Handbook of Generation IV Nuclear Reactors (PIORO, I.L., Ed.),, Woodhead Publishing Series in Energy, 2016.
- [22] L. L. e. al., An Update on the Development Status of the Super-Critical Water-cooled Reactors, GIF Symposium – Paris (France) – 16-17 October 2018.
- [23] M. e. a. Yetisir, Conceptual mechanical design for a pressure-tube type supercritical, Proc. 5th Int. Sym. SCWR (ISSCWR-5), Vancouver, BC, 13-16 March, 2011.
- [24] M. e. a. Yetisir, Fuel assembly concept of the Canadian SCWR, Proc. 8th Int. Sym. SCWR (ISSCWR-8), Chengdu, Szechuan, 3-15 March 2017, 2017.
- [25] IAEA, Heat Transfer Behaviour and Thermohydraulics Code Testing for Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs), IAEA-TECDOC-1746, August 2014..
- [26] R. K. A. M. T.R. Allen, Corrosion of Zirconium Alloys, Comprehensive Nuclear Materials, volume 5, pp. 49-68., 2012.
- [27] R. S. S. Y. (. T.R. Allen, Comprehensive Nuclear Materials, Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [28] C.R.F. Azevedo, Selection of fuel cladding material for nuclear fission reactors, Eng. Fail. Anal., 2011.
- [29] K. S. Y. C. L. T. X. R. A. D. T.R. Allen, Materials Development and Selection for Corrosion Resistance: A Critical Issue in Supercritical Water Reactors, Japan: Proc. of the 16th Pacific Basin Nuclear Conference, 2008.
- [30] X. W. Z. Z. E.-H. H. M. Sun, Oxidation of 316 stainless steel in supercritical water, Corros. Sci.,



2009.

- [31] K. S. T. A. Y. Chen, Corrosion behavior of ferritic-martensitic steel T91 in supercritical water, *Corros. Sci.*, 2006.
- [32] Y. Y. T. A. L. Tan, Oxidation behavior of iron-based alloy HCM12A exposed in supercritical water, *Corros. Sci.* , 2006.
- [33] B. L. S. K. J. J. Y. Yi, Corrosion and corrosion fatigue behaviors of 9cr steel in a supercritical water condition, *Mater. Sci. Eng.* , 2006.
- [34] Y. M. A. e. a. BEHNAMIAN, A comparative study of oxide scales grown on stainless steel and nickel-based superalloys in ultra-high temperature supercritical water at 800 °C, *Corrosion Science*, 2016.
- [35] O. N. E. Agency, Status Report on Structural Materials, 2013.
- [36] P. S. P. J. P. R. Novotný, High Cr ODS steels performance under supercritical water environment, *The Journal of Supercritical Fluids*, 2013.
- [37] E. A. Z. G. S. Rongsheng Zhou, Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic alloys in supercritical water, *Journal of Nuclear Materials*, 2009.
- [38] J. L. B. S. A. W. Z. M. M. M. P. Yimin Zeng, Corrosion and Stress Corrosion Cracking of UNS S31008 and UNS N08810 Alloys in Supercritical Water, *NACE International*, 2015.
- [39] X. W. Z. Z.-H. H. Mingcheng Sun, Oxidation of 316 stainless steel in supercritical water, 2009.
- [40] L. L. B. T. M.-C. L. E. A. Sarata Cissé, Effect of surface preparation on the corrosion of austenitic stainless steel 304L in high temperature steam and simulated PWR primary water, *Corrosion Science*, 2012.
- [41] J. W. D. Callister, *Materials Science and Engineering an Introduction*, 7th Edition, Chapter 11, *Jon Wiley & Sons, Inc.* , 2007.
- [42] S. Samal, High-Temperature Oxidation of Metals, September 7th 2016.
- [43] T. Y. T. T. G. C. K. Arioka, Cold Work and Temperature Dependence of Stress Corrosion Crack Growth of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated and Oxygenated High-Temperature Water, *CORROSION*, 2007.
- [44] G. S. W. S. Teyseyre, Stress Corrosion Cracking of Austenitic Alloys in Supercritical Water, *CORROSION SCIENCE*, 2015.
- [45] D. M. A. C. D. RODRIGUEZ, On the oxidation of stainless steel alloy 304 in subcritical and

- supercritical water, *Journal of Nuclear Materials*, 2014.
- [46] W. W. O. G. D. L. J. H. X. S. R. B. C. LI, Effect of Pressure on the Corrosion of Materials in High Temperature Water, in: *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*, Springer, 2015.
- [47] S. T. Z. J. G. S. Was, *Corrosion of Austenitic Alloys in Supercritical Water*, CORROSION SCIENCE, 2006.
- [48] T. K. S. H. H. S. M. L. J. S. J. J. L. JONSSON, Oxidation After Breakdown of the Chromium-Rich Scale on Stainless Steels at High Temperature: Internal Oxidation, *Oxidation of Metals*, 85, 2016, p. 509-536..
- [49] Y. M. A. K. A. A. B. S. D. Z. W. G. D. C. M. C. W. L. J. BEHNAMIAN, Characterization of oxide scales grown on alloy 310S stainless steel after long term exposure to supercritical water at 500 C, *Materials Characterization*, 120, 2016 p. 273-284..
- [50] K. C. X. G. L. Z. Zhao Shen, A study on the corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of 310-ODS steel in supercritical water, *Journal of Nuclear Materials*, November 2018.
- [51] X. F. Y. G. W. T. R. C. K. S. Z. Z. L. GUO, Corrosion re-sistance of candidate cladding materials for supercritical water reactor, *Annals of Nuclear Energy*, 127, 2019, p. 351–363..
- [52] F. Z. Y. B. a. R. T. L. Zhang, Corrosion Tests of Candidate Fuel Cladding and Reactor Internal Structural Materials, *The 2nd Canada-China Joint Workshop on Supercritical Water-Cooled Reactors (CCSC-2010)*, 2010..
- [53] P. A. G. G. S. T. E. W. T. A. K. S. L. T. Y. C. X. R. a. C. P. G. Was, Corrosion and Stress Corrosion Cracking in Supercritical Water, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 371, p. 176–201, 2007..
- [54] Y. Z. a. D. GUZONAS, Corrosion Assessment of Candidate Materials for Fuel Cladding, *JOM*, Vol. 68, 2016.
- [55] B. B. X. X. H. S. P. SUZAN, Oxidation Behaviour of Alloys 800H, 3033 and 304 in High-Temperature Supercritical Water, *Oxidation of Metals*, 89, 2018, p. 151-163.
- [56] Y. G. D. ZENG, Corrosion Assessment of Candidate Materials for Fuel Cladding in Canadian SCWR, *JOM*, 68, no. 2, 2016, p. 475-479..
- [57] Y. B. R. T. Lefu Zhang, Selection and corrosion evaluation tests of candidate SCWR fuel cladding materials, *Nucl. Eng. Des.* 249(2012)180-187..
- [58] P. A. G. G. S. T. E. W. T. A. K. S. L. T. Y. C. X. R. C. P. G.S. Was, Corrosion and stress corrosion cracking in supercritical water, *J. Nucl. Mater.* 371(2007): 176-201..
- [59] H. N. M. P. S. S. J. AKHIANI, The oxidation resistance of thermo-mechanically processed Incoloy

800HT in supercritical water, *The Journal of Supercritical Fluids*, 2015.

- [60] J. W. S. T. X. W. Y. L. Y. YANG, Effect of low oxygen concentration on the oxidation behavior of Ni-based alloys 625 and 825 in supercritical water, *The Journal of Supercritical Fluids*, 131, 2018, p. 1-10..
- [61] M. M. L. T. M. C. J. PAYET, Corrosion mechanism of a Ni-based alloy in supercritical water: Impact of surface plastic deformation, *Corrosion Science*, 100, 2015, p. 47-56..
- [62] D. M. A. K. Z. C. D. RODRIGUEZ, Surface chemistry and corrosion behavior of Inconel 625 and 718 in subcritical, supercritical, and ultrasupercritical water, *Applied Surface Science*, 40415, 2017, p. 443-451..
- [63] D. P. S. C. W. Z. W. K. J. GUZONAS, The reproducibility of corrosion testing in supercritical water—Results of an international interlaboratory comparison exercise, *Corrosion Science* Volume, 106, 2016, p.147-156..
- [64] B. B. X. X. H. S. P. SUZAN, Oxidation Behaviour of Alloys 800H, 3033 and 304 in High-Temperature Supercritical Water, *Oxidation of Metals*, 89, 2018, p. 151-163..
- [65] W. S. M. W. S. KUANG, Insights into the stress corrosion cracking of solution an-nealed alloy 690 in simulated pressurized water reactor primary water under dynamic straining, *Acta Materialia*, 1511, 2018, p. 321-333..
- [66] L. A. T. R. Y. Y. TAN, Corrosion behavior of alloy 800H (Fe-21Cr-32Ni) in super-critical water, *Corros. Sci.*, 53, 2011, p. 703-711.
- [67] I. B. M. B. P. K. A. T. S. PENTTILÄ, Oxidation model for construction materials in supercritical water - Estimation of kinetic and transport parameters, *Corrosion Science*, 100, 2015, p. 36-46.
- [68] N. N. T. N. M. S. Y. K. Y. W. R. Fujisawa, Corrosion Behavior of Nickel-Based Alloys and Type 316 Stainless Steel in Slightly Oxidizing or Reducing Supercritical Water, *Corrosion*, vol. 62, no. 3, pp. 270-274, 2006..
- [69] Y. C. X. R. K. S. L. T. G. W. E. W. D. G. T.R. Allen, 5.12 - Material Performance in Supercritical Water, R.J.M. Konings (Ed.) *Comprehensive Nuclear Materials*, Elsevier, Oxford, 2012, pp. 279-326.
- [70] K. S. T. A. X. Ren, Corrosion Behavior of Alloys 625 and 718 in Supercritical Water, *Corrosion*, 63 (2007) 603-612.
- [71] X. R. K. S. T. A. L. Tan, Corrosion behavior of Ni-base alloys for advanced high temperature water-cooled nuclear plants, *Corrosion Science*, 50 (2008) 3056-3062.
- [72] K. S. S.-i. K. T. Fujii, Effect of pressure on corrosion of Inconel 625 in supercritical water up to

- 100 MPa with acids or oxygen, *The Journal of Supercritical Fluids* 95 (2014) 285-291.
- [73] K. S. T. R. A. X. Ren, Corrosion Behavior of Alloys 625 and 718 in Supercritical Water, *Corrosion*, 2007, 63: 603–612. .
- [74] M. Kutz, *Supercritical Water Oxidation, Environmentally Conscious Materials and Chemical Processing*, Chapter 13, John Wiley & Sons, Inc., 2007..
- [75] A. Asl și M. Khajenoori, Subcritical water extraction. In *Mass Transfer - Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling* (pp. 459–487), 2013.
- [76] E. D. P. Kritzer, An Assessment of Supercritical Water Oxidation (SCWO). Existing Problems, Possible Solutions and New Reactor Concepts, *Chemical Engineering Journal*, vol. 83, pp. 207-214, 2001..
- [77] P. Kritzer, Corrosion in High-Temperature and Supercritical Water and Aqueous Solution: A Review, *Journal of Supercritical Fluids*, vol. 29, pp. 1-29, 2004..
- [78] C. B. W. F. Bogaerts, *Electrochemistry and Corrosion of Alloys in High-Temperature Water*, , EPRIReport NP-4705, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1986..
- [79] C. B. W. F. Bogaerts, *High-Temperature Electrochemistry and Corrosion*, EPRI-Report NP-5863, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1988..
- [80] D. J. D. P. E. Manning, The Effect of Temperature (25–289oC) On Pit Initiation In Single Phase And Duplex 304L Stainless Steels In 100 ppm Cl– Solution, *Corrosion Sci.* 20, pp. 597-609, 1980..
- [81] P. K. a. L. N. T.R. Allen, *Corrosion of Candidate Materials for Supercritical Water-Cooled Reactors*, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2005.
- [82] R. T. W. T. G. L. Hongsheng Chen, Effect of exposure temperature on the corrosion behaviors of TP347H austenitic stainless steel in supercritical water, *Corrosion Science* , 2019.
- [83] *Supercritical Water Reactor (SCWR) Survey of Materials Experience and R&D Needs to Assess Viability*, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL), 2003.
- [84] ASTM A262 Intergranular Corrosion Testing of Stainless Steels.
- [85] P. Kritzer, Corrosion in High-Temperature and Supercritical Water and Aqueous Solution: A Review, *Journal of Supercritical Fluids*, vol. 29, pp. 1-29, 2004..
- [86] D. G. R. W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th Edition, Wiley and Sons, Inc., 2009.
- [87] N. B. E. D. P. Kritzer, Factors Controlling Corrosion In High-Temperature Aqueous Solutions: A Contribution to the Dissociation and Solubility Data Influencing Corrosion Processes, *Journal of*

Supercritical Fluids, vol. 15, pp. 205-227, 1999..

- [88] D. R. A. M. a. M. J. C. M. Dolores Bermejo, Experimental Performance and Modeling of a New Cooled-Wall Reactor for the Supercritical Water Oxidation, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, 13, 6262–6272.
- [89] R. O. W. G. Cook, Pourbaix Diagrams for Iron, Nickel, and Chromium in Sub-Critical and Supercritical Water, *The 2nd Canada-China Joint Workshop on Supercritical Water-Cooled Reactors*, Toronto, Canada, April 25-28, 2010..
- [90] N. B. E. D. P. Kritzer, Transpassive Dissolution of Alloy 625, Chromium, Nickel, and Molybdenum in High-Temperature Solutions Containing Hydrochloric Acid and Oxygen, *Corrosion* 56, pp. 265-272, 2000..
- [91] ASTM G1-03(2017)e1, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [92] J. McCall, *Metallographic Specimen Preparation: Optical and Electron Microscopy*, Springer (1 Jun. 1974).
- [93] D. E. N. J. R. M. N. W. R. J. H. J. S. D. C. J. Joseph I. Goldstein, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Fourth Edition Springer ISBN 978-0-306-47292-3. Retrieved 26 May 2012.
- [94] K. Viacheslav, *SCANNING ELECTRON MICROSCOPY*, 2012.
- [95] [www.icdd.com](http://www.icdd.com).
- [96] [www.crystallography.net/new.html](http://www.crystallography.net/new.html).
- [97] J. V. P.M. de Wolff, Absolute intensities, Rep. 641.109 Technische Physische Dienst, Delft 1964..
- [98] [www.outokumpu.com](http://www.outokumpu.com).
- [99] K. C. C.S. Pande, Nanomechanics of Hall–Petch relationship, *Progress in Materials Science* 54 (2009) 689–706.
- [100] Instruction BX51/BX52 sistem microscope (tehnical book).
- [101] J. Li, X. Huang, Y. Zeng, W. Zheng, O. T. Woo și D. Guzonas, Microscopy investigation on the corrosion of Canadian generation IV SCWR materials, *Pacific Basin Nuclear Conference*, Vancouver, British Columbia (Canada), 24-28 Aug 2014 .
- [102] J. Goldstein, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Springer. ISBN 978-0-306-47292-3. Retrieved 26 May 2012.
- [103] B. H. Y. J. E. Z. Y. L. W. Z. Z. GONG, Effect of Oxidation Chemistry of Supercritical Water on

Stress Corrosion Cracking of Austenitic Steels, J of Nuclear Rad Sci., 2016.

[104] Y. M. A. e. a. BEHNAMIAN, A comparative study of oxide scales grown on stainless steel and nickel-based superalloys in ultra-high temperature supercritical water at 800 °C, Corrosion Science, 2016.